

А.В. РУДИК, канд. техн. наук, доцент, ЧДТУ, Чернігів

ВПЛИВ ПОХИБОК НАЛАДКИ ВЕРСТАТУ МОДЕЛІ 3342 АДО НА ПОХИБКИ ФОРМОУТВОРЕННЯ ПЛОСКИХ ПОВЕРХОНЬ

Розроблена математична модель точності формоутворення торців, яка враховує відхилення від перпендикулярності базової площини і розсіювання точок поверхні щодо неї. Розрахований і експериментально перевірений вплив параметрів наладки верстата 3342АДО на погрішність оброблених плоских торцевих поверхонь, що дозволяє на етапі удосконалення існуючих верстатів передбачати можливі неточності і діагностувати точність обробки.

Разработана математическая модель точности формообразования торцов, которая учитывает отклонение от перпендикулярности базовой плоскости и рассеивание относительно ее точек поверхности. Рассчитано и экспериментально проверено влияние параметров налажки станка 3342АДО на погрешность обработанных плоских торцевых поверхностей, что позволяет на этапе усовершенствования существующих станков предусматривать возможные неточности и диагностировать точность обработки.

The mathematical model of sharpening precision of butt ends which take into account deviation from perpendicularity of base plane and surface points dispersion in relation to her is developed. Expected and experimentally tested influence of adjusting parameters of machine-tool 3342АДО on the error of the treated flat butt surfaces. It allows on the stage of improvement of existent machine-tools foresee possible inaccuracies and diagnose exactness of treatment.

Питання діагностування точності обробки та розрахунку впливу похибок положення вузлів верстату на процес формоутворення на ньому були приведені в роботі Решетова Д.М. та Портмана В.Т. [1] на прикладі токарного верстата, який має порівняно просту та спрощену функцію формоутворення. Однак ці питання в роботі подані скорочено, у вигляді алгоритму. Подальші детальні дослідження верстатів у даному напрямку автору не відомі. Разом з тим, виявлення похибок формоутворення, особливо для фінішних операцій, ще на етапі проектування складного точного верстатного обладнання, та розрахунок їх внеску у загальну помилку є актуальною, поки що не вирішеною, науковою проблемою.

У роботах Кальченка В.В. [2] знаходиться функція формоутворення даного верстата у розгорнутому вигляді – з врахуванням усіх розмірів верстатних ланок. Однак питання прогнозування зміни точності при удосконаленні конструкцій вузлів не розглядаються.

Метою даної роботи є підвищення точності формоутворення плоских поверхонь деталей при однопрохідному шліфуванні на двохсторонньому верстаті моделі 3342 АДО. Дана мета досягається за рахунок використання розробленої функції формоутворення верстату [2], встановлення взаємних зв'язків між похибками виготовлення і наладки вузлів верстату (вхідними) та технологічними похибками формоутворення на ньому плоских поверхонь

(вихідними) варіаційним методом розрахунку [1] та експериментальної перевірки отриманих теоретичних залежностей.

До вхідних похибок також відносять зазори у sprzęженнях.

На кафедрі Чернігівського державного технологічного університету розроблений спосіб шліфування торцевих поверхонь деталей кругами з комбінованою правкою торців [2,3,4], де кінцева точність обробки забезпечується формотворною кромкою абразивного інструмента.

Радіус-вектор точок торцевої поверхні деталі 4 з врахуванням функції формоутворення верстату 3342 АДО (рис. 1) та формотворної кромки 5 шліфувального круга 2 [4] визначається рівнянням:

$$\vec{r}_0(\beta, \theta) = A^1(-R_B) \cdot A^6(\beta) \cdot A^3(-Z_C) \cdot A^1(-X_C) \cdot A^2(-Y_C) \cdot A^4(-\gamma) \cdot A^5(-\nu) \cdot A^1(X_C) \cdot A^6(\theta) \cdot A^1(R_{max}) \cdot A^3(Z_{max}) \cdot e^4, \quad (1)$$

де A^1, \dots, A^6 – матриці 4×4 перетворення систем координат, які моделюють зсуви і повороти уздовж і навколо координатних осей [2];

θ, β – параметри торцевої поверхні деталі, які відповідають за кутове і радіальне положення точки, кут β визначає поворот барабану подачі заготовок;

X_C, Y_C, Z_C – розміри, що визначають положення центру сферичного пальця 6 щодо барабану подачі 3 і робочої площини круга;

γ, ν – кути орієнтації шліфувальної бабки в горизонтальній і вертикальній площинах;

R_B – відстань між осями заготовок та віссю барабану подачі;

R_{max}, Z_{max} – розміри, що характеризують положення формотворної кромки 5 круга 2;

$e^4 = (0, 0, 0, 1)^T$ – радіус-вектор біжучої точки кромки 5 круга.

$$\vec{r}_0(\beta, \theta) = \begin{bmatrix} X(\beta, \theta) & Y(\beta, \theta) & Z(\beta, \theta) & 1 \end{bmatrix}^T. \quad (2)$$

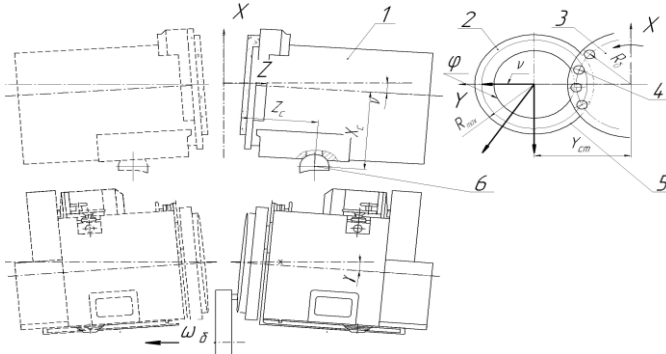
Як відомо, відхилення базових поверхонь від номінального розташування характеризується похибками положення, які у свою чергу поділяються на малі лінійні зміщення та повороти, та похибками розмірів. Отже, радіус-вектор, що визначає векторну похибку розташування базової середньоквадратичної поверхні (база для вимірювань) щодо номінальної площини торця, знаходять за рівнянням [1]

$$\Delta \vec{r}_\epsilon(\beta, \theta) = \epsilon_\epsilon \cdot \vec{r}_0(\beta, \theta) + d\vec{r}_\epsilon, \quad (3)$$

де $d\vec{r}_\epsilon$ – розмірні похибки базової поверхні, які визначають як сума добутків похідних за розмірними параметрами наладки рівняння функції формоутворення (1) на їх малі невідомі значення, для плоского торця можуть бути просто корегованими переміщенням пинолей шліфувальних бабок, тому їх не враховуємо;

ε_{δ} – загальна матриця похибок, яка враховує невідомі похибки положення базової поверхні за рахунок малих зсувів та кутових орієнтацій відносно номінальної системи координат [1]:

$$\varepsilon_{\delta} = \begin{bmatrix} 0 & -\gamma_{\delta} & \beta_{\delta} & \delta_{\delta x} \\ \gamma_{\delta} & 0 & -\alpha_{\delta} & \delta_{\delta y} \\ -\beta_{\delta} & \alpha_{\delta} & 0 & \delta_{\delta z} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$



- 1 – шліфувальна бабка верстату;
- 2 – шліфувальний круг з формотворною ділянкою;
- 3 – барабан подачі заготовок з алмазним олівцем;
- 4 – місце встановлення деталі;
- 5 – калібрувальна ділянка шліфувального круга;
- 6 – сферичний палець

Рисунок 1 – Схема верстату 3342АДО

Елементи $\delta_{x\delta}$, $\delta_{y\delta}$ та γ_{δ} загальної матриці ε_{δ} , які визначають зсуви вздовж осей X, Y та кутову орієнтацію навколо осі Z деталі, можна не враховувати, бо ці розміри не впливають на зміну положення базової площини. Елемент $\delta_{z\delta}$, як і розмірні похибки $d\vec{r}_{\delta}$, може бути легко відкоригованим на верстаті.

Вихідні параметри точності обробки, які визначають положення середньоквадратичної базової поверхні щодо обробленого торця, можуть бути описаними лише за допомогою похибок орієнтації α_{δ} , β_{δ} відносно номінальної площини навколо осей X, Y відповідно. Тоді спрощену матрицю ε_{δ}^* , що враховує малі кутові похибки, можна представити у вигляді суми добутків шуканих скалярних множників на матриці вхідних похибок [1]:

$$\varepsilon_{\delta}^* = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \beta_{\delta} & 0 \\ 0 & 0 & -\alpha_{\delta} & 0 \\ -\beta_{\delta} & \alpha_{\delta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \alpha_{\delta} \cdot D^4 + \beta_{\delta} \cdot D^5, \quad (5)$$

де D^1, \dots, D^6 – матриці похибок переміщень [2].

Не враховуючи нескінченно малі, рівняння (3) можна подати у вигляді

$$\Delta \vec{r}_\delta(\beta, \theta) = \varepsilon_\delta^* \cdot \vec{r}_0(\beta, \theta) = \alpha_\delta \cdot D^4 \cdot \vec{r}_0(\beta, \theta) + \beta_\delta \cdot D^5 \cdot \vec{r}_0(\beta, \theta). \quad (6)$$

Як добуток матриць вираз (6) для визначення векторної похибки має вигляд:

$$\Delta \vec{r}_\delta(\beta, \theta) = G(\beta, \theta) \cdot \Delta q, \quad (7)$$

де складові матриці $G(\beta, \theta)$ розмірністю 4×2 є векторами, що знайдені як похідні функції формування (1) по вихідних похибках (кути α_δ та β_δ):

$$G(\beta, \theta) = \begin{bmatrix} \partial \Delta \vec{r}_\delta(\beta, \theta) / \partial \alpha_\delta & \partial \Delta \vec{r}_\delta(\beta, \theta) / \partial \beta_\delta \end{bmatrix}; \quad (8)$$

$\Delta q = \begin{bmatrix} \alpha_\delta & \beta_\delta \end{bmatrix}^T$ – вектор вихідних похибок.

Помітимо, що матриця $G(\beta, \theta)$ побудована за правилом градієнта до середньоквадратичної базової поверхні деталі у точці з криволінійними координатами β, θ .

Використовувати рівняння типу (6), (7) зручніше, якщо спроектувати його складові на деякий напрям, звичайно на нормаль. Одиничний вектор нормалі до номінальної поверхні деталі при обраному положенні систем координат верстата спрямований вздовж осі Z (рисунок 1), тому

$$\vec{n} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T. \quad (9)$$

Тоді проекція вихідної векторної похибки на нормаль

$$\Delta r_{\delta,n}(\beta, \theta) = \varepsilon_\delta^* \cdot \vec{r}_0(\beta, \theta) \cdot \vec{n} = \begin{bmatrix} G(\beta, \theta)^T \cdot \vec{n} \end{bmatrix} \Delta q. \quad (10)$$

Скалярний добуток отриманої транспонованої матриці $G(\beta, \theta)$ з вектором одиничної нормалі визначає вектор $f(\beta, \theta)$ передатних коефіцієнтів векторних вихідних похибок у точці обробленої поверхні на напрям нормалі.

$$f(\beta, \theta) = \begin{bmatrix} G(\beta, \theta)^T \end{bmatrix} \cdot \vec{n}. \quad (11)$$

З урахуванням виразів (2), (11) вектор передатних похибок після спрощень визначають

$$f(\beta, \theta) = \begin{bmatrix} Y(\beta, \theta) \\ -X(\beta, \theta) \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Він, як і матриця ε_δ^* , складатиметься з двох елементів. Отже

$$\Delta r_{\delta,n}(\beta, \theta) = f(\beta, \theta)^T \cdot \Delta q. \quad (13)$$

Передаточні відношення (коефіцієнти) між k -ою вхідною та i -ою вихідною похибками можна визначити [2]

$$w_{ik} = \frac{\iint_S f_i \cdot \theta \cdot a_k \cdot \theta \cdot dS}{\iint_S f_i^2 \cdot \theta \cdot dS}. \quad (14)$$

де a_k – елемент матриці вхідних похибок, передаточний коефіцієнт k -ої вхідної похибки при налагодженні верстату, що враховує проекцію векторної похибки на нормаль до номінальної поверхні, S – розміри обробленої торцевої поверхні, dS – її елемент.

Встановимо вплив кутів орієнтації шліфувальних бабок верстата, як вхідних похибок, на відхилення від перпендикулярності обробленої торцевої поверхні. Потім проведемо подібний розрахунок для встановлення впливу похибки положення заготовки в барабані подачі.

Першу частину розрахунку для кутів γ та ν можна вважати як перевірку методики та в подальшому, при користуванні нею, намітити шляхи по удосконаленню конструкцій вузлів верстата. Визначимо елементи матриці вхідних похибок $a_k(\beta, \theta)$, кожен з яких відповідає за кут орієнтації. Їх можна розглядати як передаточні коефіцієнти, що враховують проекцію k -ої вхідної векторної похибки на нормаль до номінальної поверхні.

Кут ν орієнтації шліфувальних бабок у вертикальній площині необхідний для підвищення ефективності шліфування, коли торцеву поверхню інструмента включають у процес зняття припуску (рис.1). За рахунок зміни кута γ орієнтації шліфувальних бабок у горизонтальній площині зменшують похибку формоутворення торця деталі, як це доведено у роботах [2,3,4]. Саме цей кут визначає вибір формотворної ділянки, яка забезпечить найменше значення похибки.

Векторні похибки при варіюванні значеннями кутів орієнтації шліфувальних бабок визначають за допомогою залежностей [4]:

$$\vec{V}_\gamma(\beta, \theta) = A^1(-R_B) \cdot A^6(\beta) \cdot A^3(-Z_c) \cdot A^1(-X_c) \cdot A^2(-Y_c) \cdot D^4 \cdot A^4(-\gamma) \cdot A^5(-\nu) \cdot A^1(X_c) \cdot A^6(\theta) \cdot A^1(R_{\text{пых}}) \cdot A^3(Z_{\text{пых}}) \cdot \vec{e}^4,$$

$$\vec{V}_\nu(\beta, \theta) = A^1(-R_B) \cdot A^6(\beta) \cdot A^3(-Z_c) \cdot A^1(-X_c) \cdot A^2(-Y_c) \cdot A^4(-\gamma) \cdot D^5 \cdot A^5(-\nu) \cdot A^1(X_c) \cdot A^6(\theta) \cdot A^1(R_{\text{пых}}) \cdot A^3(Z_{\text{пых}}) \cdot \vec{e}^4,$$

де матриці D^4 , D^5 вхідних похибок підставлені у формотворний код поряд з відповідними матрицями орієнтації.

При кутовій наладці шліфувальних бабок верстату на кути орієнтації γ та ν в горизонтальній та вертикальній площинах [4], передаточні коефіцієнти в точці поверхні з параметрами β , θ визначають, проєктуючи отримані векторні похибки на напрям нормалі:

$$a_\gamma(\beta, \theta) = \vec{V}_\gamma(\beta, \theta) \cdot \vec{n}, \quad (15)$$

$$a_\nu(\beta, \theta) = \vec{V}_\nu(\beta, \theta) \cdot \vec{n}. \quad (16)$$

Для рішення (14) необхідно визначити елементи площі dS плоскої поверхні деталі по криволінійних координатах обробки β, θ за допомогою якобіану перетворення, який складають диференціюванням координат вектору торцевої поверхні (2) по цих параметрах:

$$dS(\beta, \theta) = \left| \begin{array}{cc} \frac{\partial X(\beta, \theta)}{\partial \theta} & \frac{\partial X(\beta, \theta)}{\partial \beta} \\ \frac{\partial Y(\beta, \theta)}{\partial \theta} & \frac{\partial Y(\beta, \theta)}{\partial \beta} \end{array} \right| \cdot d\beta \cdot d\theta. \quad (17)$$

Границі площі торцевої поверхні заготовки S визначаються граничними значеннями параметрів обробки β, θ в момент формоутворення.

Розраховані для умов прикладу обробки деталі діаметром 20 мм при кутах орієнтації кругів $\nu = 2/400$ та $\gamma = 1.6 \cdot \nu$ значення передатних коефіцієнтів подані у вигляді матриці

$$W = \begin{bmatrix} w_{\alpha\nu} & w_{\alpha\gamma} \\ w_{\beta\nu} & w_{\beta\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.769 & 0.439 \\ 0.242 & -0.251 \end{bmatrix}.$$

Тоді у матричному вигляді зв'язок між вхідними та вихідними похибками для даних розмірів наладки верстату має вигляд

$$\begin{bmatrix} \alpha_\delta \\ \beta_\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{\alpha\nu} & w_{\alpha\gamma} \\ w_{\beta\nu} & w_{\beta\gamma} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \nu \\ \gamma \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Аналізуючи отримані значення можна дійти наступних висновків про корегування похибок.

1 Вплив кутів орієнтації бабок на вихідні похибки протилежний, тому змiну значення одного з цих кутів можна частково компенсувати іншим.

2 Більше впливає на вихідні похибки кут орієнтації ν у вертикальній площині (елементи першого стовпчика матриці, які мають другий індекс ν), що потребує більшої зміни кута γ орієнтації у горизонтальній.

3 Елементи матриці передатних коефіцієнтів дозволяють визначити їх співвідношення, коли вихідна похибка формоутворення буде приймати мінімальне значення – для цього випадку сума квадратів вихідних похибок, що визначає результуючу, повинна бути мінімальною $\alpha_\delta^2 + \beta_\delta^2 \rightarrow \min$.

Тоді з рівняння (18) випливає, що

$$F(\nu, \gamma) = \left[\nu_{\alpha\nu} \cdot \nu + w_{\alpha\gamma} \cdot \gamma \right]^2 + \left[\nu_{\beta\nu} \cdot \nu + w_{\beta\gamma} \cdot \gamma \right]^2.$$

Графік цієї функції, що визначає похибку формоутворення представлений на рисунку 2.

Отримане рівняння можна записати через співвідношення кутів

$$F(\gamma/\nu) = \left[w_{\alpha\nu} + w_{\alpha\gamma} \cdot \gamma/\nu \right]^2 + \left[w_{\beta\nu} + w_{\beta\gamma} \cdot \gamma/\nu \right]^2.$$

Знаходячи похідну з нього та прирівнявши її нулеві, кінцево отримали

$$\frac{\gamma}{\nu} = - \frac{w_{\alpha\nu} \cdot w_{\alpha\gamma} + w_{\beta\nu} \cdot w_{\beta\gamma}}{\underbrace{\psi_{\alpha\gamma}}^2 + \underbrace{\psi_{\beta\gamma}}^2} = 1,5584.$$

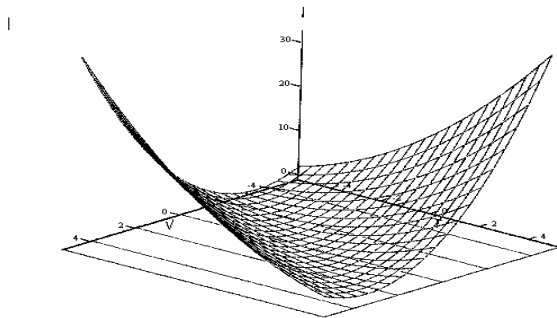


Рисунок 2 – Співвідношення між кутами орієнтації шліфувальної бабки, що визначає мінімальну похибку формоутворення

Результати даної роботи добре співвідносяться з виконаними у співпраці [3,4] та можуть бути використаними для діагностики роботи верстата моделі 3342 АДО та дослідження обробки на ньому. Крім того, вони дозволяють перевірити сходження між отриманими теоретично та при вимірах плоских торцевих поверхонь.

Доведено [2,3,4], що для верстату даних типорозмірів існує оптимальне співвідношення між кутами γ та ν . Отримана залежність, яка багаторазово перевірена при рішенні задач формоутворення проведених різними методами для кругів, що мають плоский торець [2,3]:

$$\gamma \approx 1,57 \cdot \nu. \quad (19)$$

Так в роботі [4] для підвищення точності формоутворення торця деталі наладку верстату проводять корегуванням осевого положення пінолей шліфувальних бабок і кута орієнтації їх в горизонтальній площині γ_k при заданому значенні кута ν , яке обумовлене продуктивним зняттям припуску. Тоді, матриця δ похибок вузлів матиме лише два елементи:

$$\delta = \begin{bmatrix} \delta_k & z \end{bmatrix} \quad (20)$$

Знаходимо векторні похибки варіюванням функції формоутворення (1) за параметром z [4]:

$$\vec{V}_\gamma(\theta_o, \theta) = A^6(k \cdot \theta_o) \cdot A^1(-R_E) \cdot A^6(\theta_o) \cdot A^3(-Z_c) \cdot A^1(-X_c) \cdot A^2(-Y_c) \cdot$$

$$A^4(-\gamma) \cdot A^5(-\nu) \cdot A^1(X_c) \cdot A^6(\theta) \cdot A^1(R_{\max}) \cdot D^3 \cdot A^3(Z_{\max}) \cdot \vec{e}^4,$$

де D^3 – матриця вхідної похибки положення пінолі шліфувальної бабки вздовж осі Z .

Матрицю A передатних коефіцієнтів розміром $p \times 2$ складають для p периферійних точок торцевої поверхні заготовки та двох параметрів наладки верстата γ і z . Коефіцієнти довільного рядка матриці знаходимо скалярним множенням векторних похибок на нормаль до торцевої поверхні заготовки, яка при прийнятому розташуванні системи координат (рисунок 1) збігається з вектором, спрямованим по осі Z .

Матрицю Δ похибок розміром $p \times 1$ складають по результатам виміру координат периферійної ділянки обробленої торцевої поверхні заготовки або по результатах розрахунку при формоутворенні граничним колом шліфувального круга [4].

Для визначення оптимальних значень кутів орієнтації круга в горизонтальній площині необхідно вирішити матричне рівняння [1]

$$\delta = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot \Delta.$$

Елементи вектора, підставлені із зворотнім знаком у вираз (1) дозволили отримати графік відкоригованої поверхні (рисунок 3).

Проведені експериментальні дослідження точності формоутворення торців за допомогою кругломіра “TALYROOND” (рисунок 4) підтвердили теоретичні розрахунки.

Зняті з профілограми координати N точок M_1, M_2, \dots, M_N обробленої поверхні $\begin{bmatrix} X_i & Y_i & Z_i \end{bmatrix}$, які як правило, розташовані на колі, радіусом R траєкторії руху вимірювального пристрою. Необхідно визначити шукані коефіцієнти a, b, d рівняння базової площини.

Систему лінійних рівнянь, що описують положення базової площини, записують згідно принципу Лежандра, використовуючи мінімум суми квадратів помилок:

$$S = \sum_{i=1}^N \begin{bmatrix} a \cdot X_i + b \cdot Y_i + d - Z_i \end{bmatrix}^2 = \min. \quad (21)$$

$$\frac{\partial S}{\partial a} = \frac{\partial S}{\partial b} = \frac{\partial S}{\partial d} = 0, \quad (22)$$

Систему, яка складається з трьох лінійних рівнянь (22), рішають відносно невідомих коефіцієнтів за допомогою матриць:

$$A \cdot K = \delta \quad (23)$$

$$\text{де } A = \begin{bmatrix} \sum_N X_i \cdot X_i & \sum_N X_i \cdot Y_i & \sum_N X_i \\ \sum_N Y_i \cdot X_i & \sum_N Y_i \cdot Y_i & \sum_N Y_i \\ \sum_N X_i & \sum_N Y_i & N \end{bmatrix}, \quad \delta = \begin{bmatrix} \sum_N X_i \cdot Z_i \\ \sum_N Y_i \cdot Z_i \\ \sum_N Z_i \end{bmatrix} - \text{матриці, стрічки яких}$$

складені з сум добутоків координат точок обробленої поверхні $M_i(X_i, Y_i, Z_i)$;

$K = \begin{bmatrix} 1 & b & d^T \end{bmatrix}$ – шуканий вектор коефіцієнтів базової площини, що визначається рішенням матричного рівняння

$$K = A^{-1} \cdot \delta \quad (24)$$

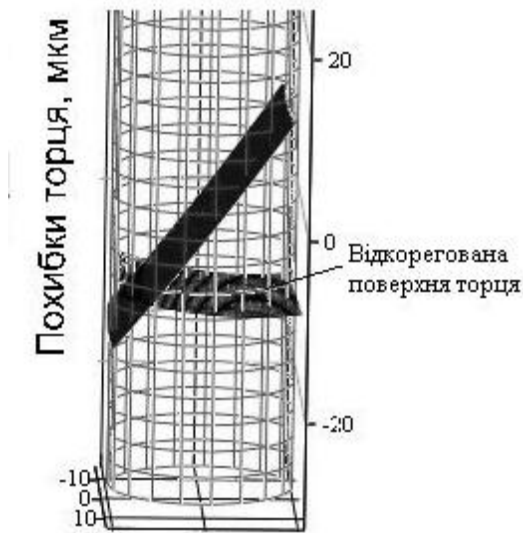


Рисунок 3 – Виправлення похибки торцевої поверхні деталі за рахунок варіювання функцією формоутворення

Таким чином, рівняння базової площини має вигляд

$$Z = a \cdot x + b \cdot y + d \quad (25)$$

Визначимо відхилення точок M_1, M_2, \dots, M_N обробленої поверхні відносно базової площини, для чого сумістимо координату XU з базовою площиною.

Матриця, яка відповідає похибкам положення базової площини описується рівнянням (4). Елементи її $\delta_x, \delta_y, \gamma$ можна не враховувати, через те що вони не призводять до зміни положення площини у просторі. Елементи α_6, β_6 матриці ε_6 відповідають кутовим похибкам навколо осей X та Y відповідно, а елемент – зсуву δ_z вздовж осі Z .

Ці елементи матриць визначають з рівнянь (рисунок 5)

$$\alpha_6 = \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}}, \quad \beta_6 = \frac{-a}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}}, \quad \delta_z = \frac{d}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}}. \quad (26)$$

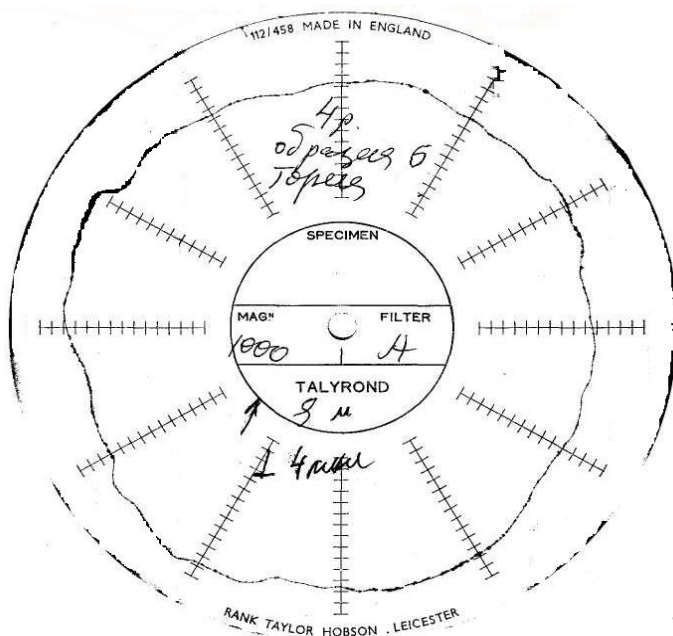


Рисунок 4 – Профілограма торцевого биття

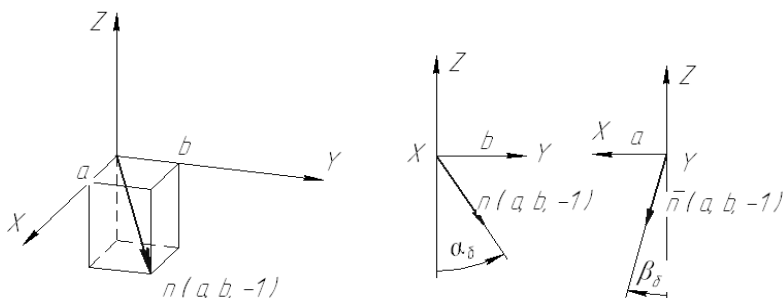


Рисунок 5 – Схема до визначення похибок положення базової площини

Тоді матрицю ε_{δ} похибок положення базової площини записують

$$\varepsilon_{\delta} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \beta_{\delta} & 0 \\ 0 & 0 & -\alpha_{\delta} & 0 \\ -\beta_{\delta} & \alpha_{\delta} & 0 & \delta_{\delta z} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (27)$$

Враховуючи дані величини зі зворотнім знаком, можна корегувати положення базової площини як основи вимірювань (рисунок 6, а,б).

$$\overrightarrow{r_{\text{корек}}} = \overrightarrow{r_0} - \Delta \overrightarrow{r_{\delta}} = \overrightarrow{r_0} - \varepsilon_{\delta} \cdot \overrightarrow{r_0}. \quad (28)$$

Відхилення від перпендикулярності базової площини визначають між нормаллю до неї і віссю деталі Z.

$$\gamma \approx \sqrt{\alpha_{\delta}^2 + \beta_{\delta}^2}. \quad (29)$$

Відхилення від площини визначають по різниці найбільшого и найменшого значень координат Z. Розсіювання вектору навколо базової площини визначають за допомогою функції середньо квадратичного відхилення у пакеті MathCAD.

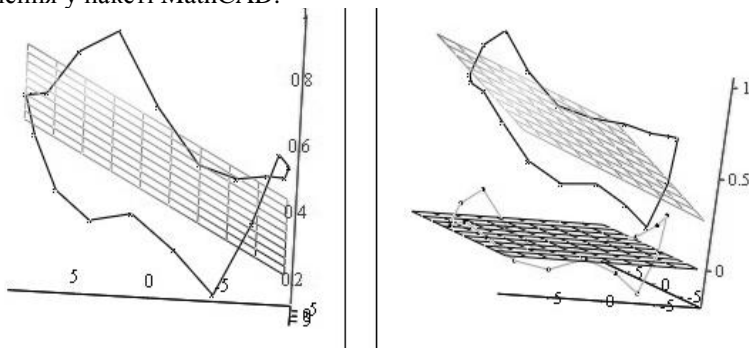


Рисунок 6 – Результати розрахунку

По отриманих з профілографи даних знаходимо відхилення від перпендикулярності $0,01^\circ$ та середньоквадратичне відхилення $0,5 \text{ мкм}$.

Крім похибок положення базової площини, що оцінюються кутом $\sqrt{\alpha_{\delta}^2 + \beta_{\delta}^2}$, математична модель яка складена з виразів (7)-(18) дозволяє визначити міру розсіювання навколо неї через середньоквадратичне відхилення (або дисперсію) у функції вхідних похибок:

$$\sigma^2 = \frac{1}{S} \cdot \iint_s \left[r_n(\beta, \theta) - \Delta r_{\delta, n}(\beta, \theta) \right]^2 dS, \quad (30)$$

де $\Delta r_{\delta, n}(\beta, \theta)$ – визначаються залежності (13), а відношення площин dS/S можна розглядати як елемент ймовірності.

Значення $\Delta r_n(\beta, \theta)$ визначають по вхідних похибках з врахуванням знайдених передатних коефіцієнтів a_k подібно до (15), (16) за виразом

$$\Delta r_n(\beta, \theta) = \sum_k a_k(\beta, \theta) \cdot q_k. \quad (31)$$

де q – вектор складений з k похибок наладки верстату.

Як бачимо теоретично розраховані похибки можна порівняти з експериментально виміряними на профілографі.

При перевірці вхідних похибок, що виникають при базуванні деталі в отворі барабану подачі заготовок, отримані наступні результати.

Зв'язок між вхідною (кут ψ) та вихідними похибками для даних розмірів наладки верстату у матричному вигляді має вигляд:

$$\begin{bmatrix} \alpha_{\phi} \\ \beta_{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{\alpha\phi} \\ w_{\beta\phi} \end{bmatrix} \cdot \phi = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.06 \end{bmatrix} \cdot \phi.$$

Кутова похибка формоутворення, яка описує положення базової торцевої поверхні відносно номінальної площини та визначається кутом $\sqrt{\alpha_{\phi}^2 + \beta_{\phi}^2}$, визначається сумарним передатним коефіцієнтом, що дорівнює 1,002 у той час, як ці передатні коефіцієнти для кутів ν та γ орієнтації у вертикальній та горизонтальній площинах відповідно були значно меншими і дорівнювали 0,801 та 0,501, крім того, могли бути частково взаємно компенсованими.

Дана похибка є найбільшою з розглянутих та не може бути виправленою. Вона носить випадковий характер, дещо перебільшує похибку базування. Тому її зменшення потребує удосконалення вузла базування заготовок у отворах барабану подачі, наприклад, шляхом розробки нової конструкції, зменшення кількості стиків та т.п.

Висновки

Результати роботи дозволяють давати обґрунтовані рекомендації по підвищенню точності вузлів та удосконаленню конструкції верстату, зіставляти дані виміру профілограм з очікуваними похибками форми обробки, визначати частку загальної похибки яку вносить окремий вузол.

При порівнянні впливу кутів орієнтації шліфувального круга у вертикальній та горизонтальній площинах виявилось, що на похибку більше впливає кут орієнтації у вертикальній площині. Коефіцієнти впливу мають різний знак, тому можуть бути взаємно відкоригованими.

Розрахунки показують, що похибка базування деталі у втулці барабану має найбільший передатний коефіцієнт (орієнтовно на 20% від впливу кута орієнтації у вертикальній площині) та найбільше абсолютне значення, що потребує важливості точного базування заготовки під час обробки.

Дані виміру профілограм можуть бути одержані по різних траєкторіях вимірювань, або розрахунком, що робить методику універсальною. Складені алгоритм та програми розрахунку в пакеті програм MathCAD відхилень від площинності і перпендикулярності та по визначенню матриці передатних коефіцієнтів між вхідними та вихідними похибками.

Список літератури: 1. *Решетов Д.Н., Портман В.Т.* Точность металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1986. – 336 с. 2. *Кальченко В.В.* Разработка научных основ, способов и областей эффективного шлифования при перекрещенных осях абразивного инструмента и детали. Автореф. дис. ... докт.техн.наук. Харьков, 2006, – 38 с. 3. *Венжега В.І.* Підвищення ефективності шліфування торців зі схрещеними осями деталі та круга із калібрувальною ділянкою. Автореф. дис. ... канд.техн.наук. Харьков, 2008, – 25 с. 4. *Рудик А.В., Венжега В.І.* Формоутворення торців деталей автомобілів при двосторонньому шліфуванні// Вісник Чернігівського державного технологічного університету: Збірник – Чернігів: ЧДТУ, 2008. – Вип.34.– С.80-89.

Надійшла до редколегії 17.09.2010